

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-218431

(43) 公開日 平成9年(1997)8月19日

(51) Int.Cl.⁴

G 0 2 F 1/37

識別記号

庁内整理番号

F I

G 0 2 F 1/37

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平8-47591

(22) 出願日 平成8年(1996)3月5日

(31) 優先権主張番号 特願平7-320731

(32) 優先日 平7(1995)12月8日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005201

富士写真フイルム株式会社

神奈川県南足柄市中沼210番地

(72) 発明者 園田 慎一郎

神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富

士写真フイルム株式会社内

(72) 発明者 鶴間 功

神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富

士写真フイルム株式会社内

(72) 発明者 羽島 正美

神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富

士写真フイルム株式会社内

(74) 代理人 弁理士 柳田 征史 (外1名)

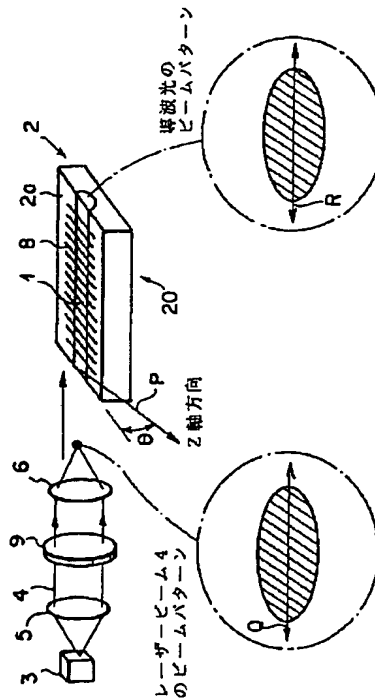
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光波長変換素子およびその作成方法並びに光波長変換モジュール

(57) 【要約】

【課題】 非線形光学効果を有する強誘電体結晶基板に、その一表面に沿って延びる光導波路が形成されるとともに、この光導波路に基板の自発分極の向きを反転させたドメイン反転部が周期的に形成されてなり、該光導波路においてドメイン反転部の並び方向に導波する基本波を波長変換する光波長変換素子において、ドメイン反転部を十分に深く形成し、複雑な基本波入射光学系を必要とせず高い波長変換効率が得られるようにする。

【解決手段】 基本波4の導波方向に垂直な面内において、基板2の自発分極の向き(Z軸方向)を、該基板2の光導波路1が形成される表面2aに対して角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) をなすように傾ける。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 非線形光学効果を有する強誘電体結晶基板に、その一表面に沿って延びる光導波路が形成されるとともに、この光導波路に基板の自発分極の向きを反転させたドメイン反転部が周期的に形成されてなり、該光導波路においてドメイン反転部の並び方向に導波する基本波を波長変換する光波長変換素子において、基本波の導波方向に垂直な面内において、前記基板の自発分極の向きが該基板の前記一表面に対して角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) をなしていることを特徴とする光波長変換素子。

【請求項 2】 前記光導波路がプロトン交換により形成されたものであって、前記角度 θ が $\theta < 70^\circ$ の範囲にあることを特徴とする請求項 1 記載の光波長変換素子。

【請求項 3】 前記光導波路がプロトン交換およびアニールにより形成されたものであって、前記角度 θ が $\theta < 20^\circ$ の範囲にあることを特徴とする請求項 1 記載の光波長変換素子。

【請求項 4】 前記角度 θ が $0.2^\circ < \theta$ の範囲にあることを特徴とする請求項 1 から 3 いずれか 1 項記載の光波長変換素子。

【請求項 5】 前記光導波路がプロトン交換およびアニールにより形成されたものであって、前記角度 θ が $0.5^\circ < \theta$ の範囲にあることを特徴とする請求項 1 から 3 いずれか 1 項記載の光波長変換素子。

【請求項 6】 前記強誘電体結晶基板として、 LiNbO_3 基板 ($0 \leq x \leq 1$) が用いられていることを特徴とする請求項 1 から 5 いずれか 1 項記載の光波長変換素子。

【請求項 7】 前記強誘電体結晶基板として、 MgO がドーピングされた LiNbO_3 基板が用いられていることを特徴とする請求項 1 から 5 いずれか 1 項記載の光波長変換素子。

【請求項 8】 単分極化された非線形光学効果を有する強誘電体結晶を、その自発分極の向きに対して角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) をなす面でカットして基板を形成し、この基板に、外部から所定パターンに従って電場を印加して、周期的に繰り返すドメイン反転部を形成し、この基板に、そのカット面と平行な一表面に沿って延びて、前記ドメイン反転部を含む光導波路を形成することを特徴とする光波長変換素子の作成方法。

【請求項 9】 前記電場を、前記基板に取り付けた所定パターンの電極を介して印加することを特徴とする請求項 8 記載の光波長変換素子の作成方法。

【請求項 10】 前記電場を印加する方法が、前記基板に取り付けた所定パターンの電極を介して直接電圧を印加する方法であることを特徴とする請求項 9 記載の光波長変換素子の作成方法。

【請求項 11】 前記電場を印加する方法が、コロナ帯

電法であることを特徴とする請求項 8 または 9 記載の光波長変換素子の作成方法。

【請求項 12】 前記電場を印加する方法が、電子線照射法であることを特徴とする請求項 8 または 9 記載の光波長変換素子の作成方法。

【請求項 13】 請求項 1 に記載の光波長変換素子と、この光波長変換素子の光導波路に基本波としてのレーザービームを入射させる半導体レーザーとから構成なり、前記光波長変換素子の光導波路においてレーザービームが TE モードで導波するように構成されていることを特徴とする光波長変換モジュール。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、基本波を第 2 高調波等に変換する光導波路型の光波長変換素子に関し、特に詳細には、光導波路基板として強誘電体結晶基板を用い、この光導波路に周期ドメイン反転構造を形成してなる光波長変換素子に関するものである。

【0002】また本発明は、上述のような光波長変換素子の作成方法および、この光波長変換素子を利用した光波長変換モジュールに関するものである。

【0003】

【従来の技術】非線形光学効果を有する強誘電体の自発分極（ドメイン）を周期的に反転させた領域を設けた光波長変換素子を用いて、基本波を第 2 高調波に波長変換する方法が既に Bleombergen らによって提案されている（Phys. Rev., vol. 127, No. 6, 1918 (1962) 参照）。この方法においては、ドメイン反転部の周期 Λ を、

$$\Lambda c = 2\pi / \{ \beta(2\omega) - 2\beta(\omega) \}$$

ただし $\beta(2\omega)$ は第 2 高調波の伝搬定数

$\beta(\omega)$ は基本波の伝搬定数

で与えられるコヒーレント長 Λc の整数倍になるように設定することで、基本波と第 2 高調波との位相整合（いわゆる疑似位相整合）を取ることができる。

【0004】そして、例えば特開平 5-29207 号に示されるように、非線形光学材料からなる光導波路を有し、そこを導波させた基本波を波長変換する光導波路型の光波長変換素子において、上述のような周期ドメイン反転構造を形成して、効率良く位相整合を取る試みもなされている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】このように周期ドメイン反転構造を形成した従来の光導波路型の光波長変換素子は、基板の自発分極の向きから 2 つのタイプに大別されている。一方のタイプの光波長変換素子は図 3 に示すように、一つの基板表面 2a（それに沿って光導波路 1 が延びる基板表面）に対して、矢印 P で示す基板 2 の自発分極の向きが垂直になっているものであり、別のタイプの光波長変換素子は図 4 に示すように、上記基板表面 2a に対して基板 2 の自発分極の向きが平行になっ

ているものである。

【0006】前者のタイプの光波長変換素子は、例えば上記の特開平5-29207号等に示されているものであり、ドメイン反転部を基板表面から十分に深く形成できる反面、半導体レーザーと組み合わせて用いる場合には基本波の入射光学系が複雑化するという難点が認められる。以下、この点について詳しく説明する。

【0007】図3の構成において、導波光のビームパターンは図中Aで示すように、矢印Rで示す偏光ベクトルの向きに平行な方向のビーム径が小さく、それに直角な方向のビーム径が大きいものとなる。またこのとき、偏光ベクトルの向きは基板2の自発分極の向き（一般に LiNbO_3 等の強誘電体において、自発分極の向きはZ軸と平行である）と一致し、導波モードはTMモードとなる。一方、半導体レーザー3から出射したレーザービーム4のビームパターンは、図中Bに示すように、矢印Qで示す偏光ベクトルの向きに平行な方向のビーム径が大きく、それに直角な方向のビーム径が小さいものとなる。

【0008】そこで、半導体レーザー3から出射したレーザービーム4を光導波路1に入力させるためにそれぞれの偏光方向を合わせるとビーム形状がミスマッチし、レーザービーム4を効率良く光導波路1に入力させることができない。そうであると、第2高調波の強度が小さいものになってしまう。

【0009】そこで、レーザービーム4のビームパターンはそのままにしてその偏光方向を 90° 回転させるために、コリメーターレンズ5と集光レンズ6との間に $\lambda/2$ 板7を配してなる複雑な基本波入射光学系が必要となる。

【0010】それに対して、図4に示すタイプの光波長変換素子の場合は、上記のような $\lambda/2$ 板7を配さない状態でレーザービーム4の直線偏光方向と基板2のZ軸方向とが一致するので、複雑な基本波入射光学系は不要で、また半導体レーザー3を光導波路1の端面に直接結合することも可能となる。なお、このときの導波モードはTEモードとなる。

【0011】しかしその反面、この図4に示すタイプの光波長変換素子は、ドメイン反転部8を基板表面2aから十分に深く形成することができないという問題がある。この点を、図19を参照して詳しく説明する。

【0012】この図19において、Dはドメイン反転部8を形成するための電極を示している。また、ドメイン反転部8の並び方向および基板2の厚さ方向は、それぞれ基板のX軸方向およびY軸方向である。波長変換する基本波の実際の波長を考慮すると、図中aで示すドメイン反転部8の周期は数 μm 程度となる。これを便宜的に $5\mu\text{m}$ とすると、最大波長変換効率を得るためにドメイン反転部8の幅と非反転部の幅との比を1:1にするためには、ドメイン反転部8の幅（図中のb寸法）は2.

$5\mu\text{m}$ となる。電極Dを現在の一般的なプロセスで作成する場合、図中cで示す電極線幅を $0.5\mu\text{m}$ よりも細くするのは困難であり、 $c=0.5\mu\text{m}$ とすると、電極Dからドメイン反転部8の並び方向に $d=1\mu\text{m}$ だけドメイン反転部8を成長させれば、ドメイン反転部8の幅が $2.5\mu\text{m}$ となる。

【0013】ドメイン反転領域の成長速度は、基板2の自発分極の向きに沿った方向では大きく、自発分極の向きと垂直な方向（つまりX軸方向およびY軸方向）では小さくなっており、また、ドメイン反転領域のX軸方向およびY軸方向の成長速度は同じである。したがって、上述のようにしてドメイン反転部8の幅を $2.5\mu\text{m}$ とすると、その深さ（Y軸方向の寸法）は $1\mu\text{m}$ 程度となってしまう。

【0014】以上のような理由により、本タイプの従来の光波長変換素子においては、ドメイン反転部の深さが導波光の界分布よりも浅い $1\mu\text{m}$ 程度にとどまっており、そのため、ドメイン反転部と導波光との重なり積分が小さくて波長変換効率が低くなるという問題があった。

【0015】本発明は上記の事情に鑑みてなされたものであり、ドメイン反転部が十分に深く形成され、その一方、半導体レーザーを基本波光源として用いる場合に、複雑な基本波入射光学系を必要とせずに高い波長変換効率が得られる光波長変換素子を提供することを目的とするものである。

【0016】また本発明は、そのような光波長変換素子を作成する方法を提供することを目的とするものである。

【0017】さらに本発明は、そのような光波長変換素子を用いて、高い波長変換効率の下に高出力の波長変換波を発生することができる光波長変換モジュールを提供することを目的とするものである。

【0018】

【課題を解決するための手段】本発明による光波長変換素子は、請求項1に記載の通り、非線形光学効果を有する強誘電体結晶基板に、その一表面に沿って延びる光導波路が形成されるとともに、この光導波路に基板の自発分極の向きを反転させたドメイン反転部が周期的に形成されてなり、該光導波路においてドメイン反転部の並び方向に導波する基本波を波長変換する光波長変換素子において、基本波の導波方向に垂直な面内において、基板の自発分極の向きが該基板の上記一表面に対して、角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) をなしていることを特徴とするものである。

【0019】なお上記角度 θ の上限値について考えると、光導波路がプロトン交換により形成されたものである場合は、請求項2に記載のように $\theta < 70^\circ$ に設定するのが望ましい。また、光導波路がプロトン交換およびアニールにより形成されたものである場合は、請求項3に

記載のように $\theta < 20^\circ$ に設定するのが望ましい。

【0020】一方、この角度 θ の下限値について考えると、請求項4に記載のように $0.2^\circ < \theta$ とするのが望ましく、請求項5に記載のように $0.5^\circ < \theta$ とすればさらに好ましい。

【0021】また、本発明に好適に用いられる強誘電体結晶基板としては、請求項6に記載のように何もドーピングされていない $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)や、請求項7に記載のように MgO がドーピングされた LiNbO_3 基板が挙げられるが、本発明ではそれに限らず、 Zn がドーピングされた $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 基板や、 Sc 、 MgO がドーピングされた $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 基板や、 KTiOPO_4 、 KNbO_3 等のその他の材料からなる基板を用いることも可能である。上記の MgO がドーピングされた LiNbO_3 基板は、光損傷に強いので、ノンドーピングの $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 基板等よりも好ましい。

【0022】一方、上記構成の光波長変換素子を得るための本発明による光波長変換素子の作成方法は、請求項8に記載の通り、単分極化された非線形光学効果を有する強誘電体結晶を、その自発分極の向きに対して角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)をなす面でカットして基板を形成し、この基板に、外部から所定パターンに従って電場を印加して、周期的に繰り返すドメイン反転部を形成し、この基板に、そのカット面と平行な一表面に沿って延びて、上記ドメイン反転部を含む光導波路を形成することを特徴とするものである。

【0023】なおこの光波長変換素子の作成方法において、上記電場の印加は、請求項9に記載のように、基板に取り付けた所定パターンの電極を介して行なうことにより、良好になされ得る。

【0024】またこのような電極を用いる場合は、請求項10に記載のように、該電極を介して直接電圧を印加する方法を好適に用いることができる。

【0025】またこの電場の印加は、請求項11に記載のようにコロナ帯電法を適用しても、さらには請求項12に記載のように電子線照射法を適用しても良好になされ得るものである。

【0026】一方、本発明による光波長変換モジュールは請求項13に記載のように、上述した本発明による光波長変換素子と、この光波長変換素子の光導波路に基本波としてのレーザービームを入射させる半導体レーザーとからなり、そして、光波長変換素子の光導波路においてレーザービームがTEモードで導波するように構成されていることを特徴とするものである。

【0027】

【発明の効果】上記構成を有する本発明の光波長変換素子においては、図1に示すように基板2の自発分極の向きつまりZ軸方向が、基板表面2aに対して垂直にはなっていないので、半導体レーザー3から出射したレーザ

ービーム4をその直線偏光方向(矢印Q方向)が基板表面2aと平行となる状態で光導波路1に入射させても、非線形光学定数 d_{33} が利用されて波長変換が可能となる。なおこの場合、レーザービーム4の電界ベクトルの向きは基板表面2aと平行な向きとなり、該レーザービーム4は光導波路1をTEモードで導波する。そのときの実効的な非線形光学定数は $d_{33} \cos \theta$ となる。また図1では、前述した図3および4中のものと同等の要素には、同番号を付してある。

【0028】上記のように、レーザービーム4をその直線偏光方向が基板表面2aと平行となる状態で光導波路1に入射させるのであれば、直線偏光方向を回転させる前述の $\lambda/2$ 板等は不要で基本波入射光学系は簡単なものとなり、半導体レーザー3を光導波路1の端面に直接結合することも可能となる。また、レーザービーム4をこのようにして光導波路1に入射させる場合は、前述したようにレーザービーム4の光導波路1への入力効率も高くなる。

【0029】そして、基板2の自発分極の向きつまりZ軸方向が基板表面2aに対して角度 θ をなしているとき、図2に示すようにドメイン反転部8の深さ d は基本的に $d = L \tan \theta$ であるが、図4の従来技術に関して説明したドメイン反転領域の広がり $1 \mu\text{m}$ を考慮すれば $d = L \tan \theta + 1 \mu\text{m} \dots\dots (1)$

となる。ここで L の値は、ドメイン反転させるために電場を印加する手段(図2では、一例として楕形電極10と平板電極11を示す)の大きさによって直接的に定まるものではなく、 θ の値が大きくなるにつれて増大する傾向を示す。なお、先に図4に示した従来装置においては $\theta = 0^\circ$ としてドメイン反転部8を形成するから L が最小となり、図3に示した従来装置においては $\theta = 90^\circ$ としてドメイン反転部8を形成するから L が最大(つまり電場印加用電極に対向する部分全域でドメイン反転が起きる)となっている。

【0030】そこで、 θ をある程度大きく設定することにより、ドメイン反転部8の深さ d を十分に大きくすることが可能である。このようにしてドメイン反転部8を十分に深くすることができれば、ドメイン反転部8と導波光との重なり積分が大きくなり、高い波長変換効率が得られるようになる。

【0031】本発明の光波長変換モジュールは、上記構成の光波長変換素子を用いた上で、実際にレーザービームがTEモードで導波するように半導体レーザーを配設したものであるから、上述の通りにレーザービームの光導波路への入力効率が高くなり、基本波入射光学系は簡単なものとなり、そして高い波長変換効率が得られるものとなる。

【0032】なお従来より、プロトン交換光導波路において光ビームがTEシングルモードで導波するのは、Z軸と基板表面とがなす角度 ϕ が $0^\circ < \phi < 70^\circ$ の場合で

あると考えられている（例えばJournal of Optical Communications 5(1984)1, pp16~19参照）。本発明においては、この角度 ϕ がすなわち角度 θ であるから、光導波路がプロトン交換により形成されたものである場合は、角度 θ を $\theta < 70^\circ$ の範囲に設定すると、波長変換が効率良くなされるようになる。

【0033】また、プロトン交換およびその後のアニールによって形成された光導波路において光ビームがTEシングルモードで導波するのは、Z軸と基板表面とがなす角度 ϕ が $0^\circ < \phi < 20^\circ$ の場合であることが分かっている。したがって、光導波路がプロトン交換およびアニールにより形成されたものである場合は、角度 θ を $\theta < 20^\circ$ の範囲に設定すると、波長変換が効率良くなされるようになる。

【0034】一方、最大の波長変換効率が得られる最適なデューティ比を持つ（つまりドメイン反転部と非反転部の幅の比が1:1である）ドメイン反転構造を形成した場合、図2に示した寸法は、 θ が数度以内であれば概ね50 μm となることが分かった。また一般に、導波モードの界分布は最も細くすると1.2 μm 程度にすることができる。したがって前述の(1)式より、 $\theta = 0.2^\circ$ とすればドメイン反転部の深さ $d = 1.2\mu\text{m}$ となり、ドメイン反転部がその深さ方向において導波モードの界分布とほぼ同サイズとなる。したがって、 $0.2^\circ < \theta$ とすれば、ドメイン反転部が導波モードの界分布と重なって余りあるものとなり、波長変換が効率良くなされるようになる。

【0035】なお、導波モードの界分布は上述のように最小で1.2 μm 程度とすることができるが、この界分布が大きい程、外部光を光導波路に安定して入射させることができる。実際上は、この導波モードの界分布が1.4 μm より大きければ外部光が光導波路に安定して入射する。前述の(1)式より、 $\theta = 0.5^\circ$ とすればドメイン反転部の深さ $d = 1.4\mu\text{m}$ となるので、 $0.5^\circ < \theta$ とすれば基本波が光導波路に安定して入射し、またドメイン反転部が導波モードの界分布と重なって波長変換が効率良くなされるようになる。

【0036】

【発明の実施の形態】以下図面を参照して、本発明の実施の形態を説明する。図5は、本発明の第1の実施の形態による光波長変換素子を作成する一工程を示すものである。図中の2は、非線形光学効果を有する強誘電体である、MgOが5mol%ドーピングされたLiNbO₃（以下、MgO-LNと称する）の基板である。このMgO-LN基板2は、図6に示すようにMgO-LNのインゴット2'をZ軸方向に対して角度 $\theta = 3^\circ$ をなす方向にカット、研磨して得られたものであり、単分極化処理がなされて例えば厚さ0.3mmに形成されている。なお、この研磨角度 $\theta = 3^\circ$ の精度は $\pm 0.1^\circ$ である。

【0037】以上のように形成されたMgO-LN基板

2の表面2a、2bと平行でX軸と直交する方向、および基板表面2a、2bに対して垂直な方向はそれぞれ、Z軸方向およびY軸方向に対して角度 $\theta = 3^\circ$ をなす方向となるので、これらの方向を便宜的にそれぞれZ'方向、Y'方向と称する（以下、同様）。

【0038】上記MgO-LN基板2の表面2a、2bに、図5のようにそれぞれ櫛形電極10、平板電極11を取り付け、+Z側に位置する櫛形電極10の方が正電位、-Z側に位置する平板電極11の方が負電位となるようにして、両電極10、11間にパルス電圧を印加すると、図7に概略図示するように、+Z方向を向いていた基板2の自発分極の向きが電圧印加部分において反転して、ドメイン反転部8が形成される。なお上記自発分極の向きは、基板表面2aに対して $\theta = 3^\circ$ 傾いており、したがってドメイン反転部8の分極の向きも基板表面2aに対して同様に傾くことになる。

【0039】本例では、櫛形電極10および平板電極11をCrから形成したが、MgO-LN基板2よりも電気伝導度が十分低い材料ならば何でも電極材料として用いることができる。櫛形電極10および平板電極11は周知のフォトリソグラフィによって形成することができ、厚さは例えば20~100 μm 、長さ L_1 は例えば6mm、両電極10、11間のギャップGは例えば100~500 μm とすればよい。また櫛形電極10の周期 Λ は4.75 μm 、電極指の長さおよび幅はそれぞれ1000 μm 、0.5 μm とした。そして平板電極11の幅、すなわちZ'方向の寸法は100 μm とした。

【0040】上記の電圧印加は、電流のリークを防止するために真空中で行なった。このときの真空度は、例えば 5×10^{-5} Torr以下とする。なお、このように真空中で電圧印加する代わりに、絶縁オイル中で電圧印加するようにしてもよい。また印加電圧のパルス幅は、1~10secとすればよい。

【0041】各ドメイン反転部8は、印加電圧が大きい程Z軸と垂直な方向に大きく広がるようになる。周知のように、周期ドメイン反転構造を利用して波長変換する場合の波長変換効率は、ドメイン反転部8と非反転部との導波方向の長さの比が1:1のときに最大となる。この比が1:1となるのは、例えば上記ギャップGが200 μm の場合は印加電圧を約4000Vにしたとき、ギャップGが400 μm の場合は印加電圧を約3500Vにしたときである。これらの最適電圧の値は、基板温度を室温に設定した場合のものであり、基板温度を例えば200 $^\circ\text{C}$ とすると、各場合の最適電圧は約1/3となる。

【0042】以上のようにしてドメイン反転部8が形成されたMgO-LN基板2をZ'方向に垂直な面で切断し、その断面を光学研磨した後、HF（フッ酸）とHNO₃（硝酸）とが1:2に混合されてなるエッチング液を用いて、20分間選択エッチングを行なった。この選択エッチングを行なうと、ドメイン反転部8と非反転部と

では、化学的特性の違いによりエッチングの程度に差が生じ、ドメイン反転部8がどのように形成されているかを顕微鏡により観察できるようになる。

【0043】上記断面の顕微鏡写真と、前記図4に示した従来の光波長変換素子（基板材料は同じくMgO-LNである）の同様の断面の顕微鏡写真を、それぞれ図17、図18に示す。なおこれらの顕微鏡写真の倍率は双方とも同じ2000倍であり、上述のようにしてドメイン反転部8を形成したMgO-LN基板2の方が、ドメイン反転部がより深く形成されていることが分かる。

【0044】具体的には、上述のようにして形成されたドメイン反転部8の深さは2～3μmであり、図4に示した従来の光波長変換素子におけるドメイン反転部の深さ（1μm程度）と比べて、ドメイン反転部8の深さが2～3倍となっている。

【0045】次に上記MgO-LN基板2に、以下のようにしてチャンネル光導波路を形成した。まず、ドメイン反転が最も深くなっている櫛形電極10の先端近傍に、周知のフォトリソグラフィにより、Z'方向の幅が5～9μm程度の金属（本例ではTa）のマスクを形成する。その後このMgO-LN基板2に対して、ピロリン酸中で160℃で64分間プロトン交換処理を行ない、Taマスクをエッチング液で除去した後、大気中において350℃で1時間アニールする。以上の処理により、図1に示すように、ドメイン反転部8の並び方向に沿って延びるチャンネル光導波路1が形成される。

【0046】次に上記MgO-LN基板2の、チャンネル光導波路1の端面を含む-X面および+X面を光学研磨すると、光波長変換素子が完成する。そして図1に示すように、この光波長変換素子20と基本波光源としての半導体レーザー3、並びに基本波入射光学系（コリメーターレンズ5と集光レンズ6とからなる）により光波長変換モジュールを構成した。そして、半導体レーザー3として発振波長950nm帯のものをを用い、そこから発せられたレーザービーム4を光波長変換素子20に入射させて、波長が1/2の第2高調波を発生させた。

【0047】このとき、ドメイン反転部8がレーザービーム4の導波方向に周期的に繰り返してなる周期ドメイン反転構造により、基本波としてのレーザービーム4とその第2高調波とが位相整合（いわゆる疑似位相整合）する。なお本例では、コリメーターレンズ5と集光レンズ6との間にバンドパスフィルター9を配設して、半導体レーザー3の縦モードをロックした。

【0048】上記の光波長変換モジュールにおいては、MgO-LN基板2の自発分極の向きつまりZ軸方向が、基板表面2aに対して垂直にはなっていないので、半導体レーザー3から出射したレーザービーム4をその直線偏光方向（矢印Q方向）が基板表面2aと平行となる状態で光導波路1に入射させても、非線形光学定数 d_{33} が利用されて波長変換が可能となる。なおこの場合、

レーザービーム4についての出射ビームパターンと導波ビームパターンは一致し、ビームパターンのミスマッチがないため、該レーザービーム4を高効率で光導波路1に入力させることができる。そこで、発生する第2高調波の強度が大きくなる。レーザービーム4は光導波路1をTEモードで導波し、このときの実効的な非線形光学定数は $d_{33} \cos \theta$ となる。

【0049】この場合の波長変換の換算効率は180%/Wcm²であり、例えば文献Technical Digest Of The Fourth Microoptics Conference And The Eleventh Topical Meeting On Gradient-index Optical Systems p.154等に記載されている、XまたはYカットのLiTaO₃基板に光導波路および周期ドメイン反転構造を形成してなる従来の光波長変換素子の換算効率は55%/Wcm²等と比べて、著しく高いものとなっている。

【0050】次に図8を参照して、本発明の第2の実施の形態について説明する。この図8は、本発明の第2の実施の形態による光波長変換素子を作成する一工程を示している。なおこの図8において、図5中のものと同等の要素には同番号を付してあり、それらについての説明は特に必要のない限り省略する（以下、同様）。

【0051】この第2の実施の形態は、第1の実施の形態と比較すると、基本的に平板電極11の取付位置のみが異なるものである。つまりこの場合は、前述のものと同様のMgO-LN基板2の一方の表面2aに、櫛形電極10とともに平板電極11が取り付けられ、これらの電極10、11を用いて、第1の実施の形態におけるのと同様にしてパルス電圧が印加される。なお櫛形電極10および平板電極11の形状や、それらの間のギャップG等の値も、第1の実施の形態におけるのと同じである。

【0052】しかし本例においては、ドメイン反転部と非反転部との導波方向の長さの比が1:1となるのは、ギャップGが200μmの場合は印加電圧を約1500Vにしたとき、ギャップGが400μmの場合は印加電圧を約3000Vにしたときであり、第1の実施の形態における最適電圧値とは異なっている。なお、これらの最適電圧の値は、基板温度を室温に設定した場合のものであり、この際も基板温度を例えば200℃とすると、各場合の最適電圧は約1/3となる。

【0053】以上のようにして形成されたドメイン反転部も、深さは2～3μmとなっており、図4に示した従来の光波長変換素子におけるドメイン反転部の深さ（1μm程度）と比べて2～3倍の深さが得られている。

【0054】次に上記MgO-LN基板2に、第1の実施の形態と同様にして、ドメイン反転部の並び方向に沿って延びるチャンネル光導波路を形成し、その後このチャンネル光導波路の端面を含む-X面および+X面を光学研磨することにより、光波長変換素子が完成する。この光波長変換素子を図1と同様にして第2高調波発生に用いたところ、この場合も、波長変換の換算効率は180

%/Wcm² と十分に高いものとなった。

【0055】次に図9を参照して、本発明の第3の実施の形態について説明する。この図9は、本発明の第3の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0056】この第3の実施の形態も、第1の実施の形態と比較すると、基本的に平板電極11の取付位置のみが異なるものである。つまりこの場合は、MgO-LN基板2の表面2aおよび2bの間の端面に平板電極11が取り付けられ、この平板電極11および基板表面2aに形成された櫛形電極10を用いて、第1の実施の形態におけるのと同様にしてパルス電圧が印加される。

【0057】なお櫛形電極10および平板電極11の形状や、それらの間のギャップG等の値も、第1の実施の形態におけるのと同じである。

【0058】本例においては、ドメイン反転部と非反転部との導波方向の長さの比が1:1となるのは、第2の実施の形態におけるのと同様にギャップGが200μmの場合は印加電圧を約1500Vにしたとき、ギャップGが400μmの場合は印加電圧を約3000Vにしたときであり、第1の実施の形態における最適電圧値とは異なっている。なお、これらの最適電圧の値は、基板温度を室温に設定した場合のものであり、この際も基板温度を例えば200℃とすると、各場合の最適電圧は約1/3となる。

【0059】以上のようにして形成されたドメイン反転部も、深さは2~3μmとなっており、図4に示した従来の光波長変換素子におけるドメイン反転部の深さ(1μm程度)と比べて2~3倍の深さが得られている。

【0060】次に上記MgO-LN基板2に、第1の実施の形態と同様にして、ドメイン反転部の並び方向に沿って延びるチャンネル光導波路を形成し、その後このチャンネル光導波路の端面を含む-X面および+X面を光学研磨することにより、光波長変換素子が形成される。この光波長変換素子を図1と同様にして第2高調波発生に用いたところ、この場合も、波長変換の換算効率 $は180\%/Wcm^2$ と十分に高いものとなった。

【0061】次に図10を参照して、本発明の第4の実施の形態について説明する。この図10は、本発明の第4の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0062】この第4の実施の形態は、第1の実施の形態と比較すると、MgO-LN基板2に電場を印加する方法が異なるものである。つまり本例では、コロナ帯電法によって電場が印加される。そのためにMgO-LN基板2の表面2aには、前述のものと同様の櫛形電極10が取り付けられ、この櫛形電極10は接地される。そしてMgO-LN基板2の別の表面2bに対向するようにコロナヘッド30が配され、櫛形電極10の方が正電位、コロナヘッド30の方が負電位となる電圧が印加されるように、MgO-LN基板2にコロナ帯電により電場を印加

した。

【0063】それによりこの場合も、+Z方向を向いていた基板2の自発分極の向きが電圧印加部分において反転して、図7に示したものと同様のドメイン反転部8が形成される。上記自発分極の向きは、この場合も基板表面2aに対して $\theta=3^\circ$ 傾いており、したがってドメイン反転部8の分極の向きも基板表面2aに対して同様に傾くことになる。

【0064】なお上記のコロナ帯電による電場印加は、電流のリークを防止するために、櫛形電極10を真空中に配し、コロナヘッド30は大気中に配置して行なった。なお、このように櫛形電極10を真空中に配置する代わりに、絶縁オイル中に配置してもよい。またこの電場印加は、例えばパルス幅を1~10secとして、パルス状に行なうとよい。

【0065】上述のようにして形成されたドメイン反転部8を、第1の実施の形態と同様にして顕微鏡により観察したが、この場合もドメイン反転部8の深さは、図4に示した従来の光波長変換素子におけるドメイン反転部の深さ(1μm程度)と比べて2~3倍となっていた。

【0066】次に上記MgO-LN基板2に、第1の実施の形態と同様にして、ドメイン反転部の並び方向に沿って延びるチャンネル光導波路を形成し、その後このチャンネル光導波路の端面を含む-X面および+X面を光学研磨することにより、光波長変換素子が形成される。この光波長変換素子を図1と同様にして第2高調波発生に用いたところ、この場合も、波長変換の換算効率は $180\%/Wcm^2$ と十分に高いものとなった。

【0067】次に図11を参照して、本発明の第5の実施の形態について説明する。この図11は、本発明の第5の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0068】この第5の実施の形態は、これまで説明した実施の形態と比較すると、MgO-LN基板2に電場を印加する方法が異なるものである。つまり本例では、MgO-LN基板2の表面2a、2bにそれぞれ、図5のものと同様の櫛形電極10、平板電極11が取り付けられるが、櫛形電極10は接地され、そして平板電極11には電子線40がパルス状に照射される。

【0069】それにより、+Z側に位置する櫛形電極10の方が正電位、-Z側に位置する平板電極11の方が負電位となるように電場が印加され、+Z方向を向いていた基板2の自発分極の向きが電圧印加部分において反転して、図7に示したものと同様のドメイン反転部8が形成される。なお上記自発分極の向きは、この場合も基板表面2aに対して $\theta=3^\circ$ 傾いており、したがってドメイン反転部8の分極の向きも基板表面2aに対して同様に傾くことになる。

【0070】上記電子線40の照射は、電流のリークを防止するために真空中で行なった。このときの真空度は、

例えば 5×10^{-5} Torr以下とする。また電子線照射のパルス幅は、例えば1~10sec とすればよい。

【0071】このようにしてドメイン反転部8を形成する際、ドメイン反転部8と非反転部との導波方向の長さの比が1:1となるのは、電極10、11間のギャップGが200 μ mの場合は印加電圧を約4000Vにしたとき、ギャップGが400 μ mの場合は印加電圧を約3500Vにしたときである。これらの最適電圧の値は、基板温度を室温に設定した場合のものであり、基板温度を例えば200℃とすると、各場合の最適電圧は約1/3となる。

【0072】上述のようにして形成されたドメイン反転部8を、第1の実施の形態と同様にして顕微鏡により観察したが、この場合もドメイン反転部8の深さは、図4に示した従来の光波長変換素子におけるドメイン反転部の深さ(1 μ m程度)と比べて2~3倍となっていた。

【0073】次に上記MgO-LN基板2に、第1の実施の形態と同様にして、ドメイン反転部の並び方向に沿って延びるチャンネル光導波路を形成し、その後このチャンネル光導波路の端面を含む-X面および+X面を光学研磨することにより、光波長変換素子が形成される。この光波長変換素子を図1と同様にして第2高調波発生に用いたところ、この場合も、波長変換の換算効率 $180\%/W \cdot cm^2$ と十分に高いものとなった。

【0074】次に図12を参照して、本発明の第6の実施の形態について説明する。この図12は、本発明の第6の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0075】この第6の実施の形態は、第5の実施の形態と比較すると、基本的に平板電極11の取付位置が異なるものである。つまりこの場合は、MgO-LN基板2の一方の表面2aに櫛形電極10とともに平板電極11が取り付けられ、この平板電極11に電子線40が照射されてドメイン反転部が形成される。

【0076】次に図13を参照して、本発明の第7の実施の形態について説明する。この図13は、本発明の第7の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0077】この第7の実施の形態も、第5の実施の形態と比較すると、基本的に平板電極11の取付位置が異なるものである。つまりこの場合は、MgO-LN基板2の表面2aおよび2bの間の端面に平板電極11が取り付けられ、この平板電極11に電子線40が照射されてドメイン反転部が形成される。

【0078】次に図14を参照して、本発明の第8の実施の形態について説明する。この図14は、本発明の第8の実施の形態による光波長変換素子を作成するための一工程を示している。

【0079】この第8の実施の形態においては、第5、6および7の実施の形態において設けられた平板電極11は設けられない。そしてMgO-LN基板2の表面2b

を2次的に走査するように電子線40が照射されて、以上説明したものと同様のドメイン反転部が形成される。

【0080】なお図1に示した光波長変換モジュールでは、バンドパスフィルター9を設けて半導体レーザー3の縦モードをロックしているが、その他の方法によってこの縦モードをロックすることも可能である。例えば図15に示す光波長変換モジュールでは、光波長変換素子20から出射した基本波としてのレーザービーム4およびその第2高調波4'をコリメーターレンズ50により平行光化した後、第2高調波4'はダイクロイックミラー51で反射させる一方、レーザービーム4はこのダイクロイックミラー51を透過させた後にグレーティング52で反射させて半導体レーザー3に戻すようにし、このグレーティング52の波長選択性を利用して半導体レーザー3の縦モードをロックしている。

【0081】また図16に示す光波長変換モジュールでは、光波長変換素子20の端面に半導体レーザー3が直接結合され、半導体レーザー3の縦モードはその活性層中に形成された図示しないDBR(分布ブラッグ反射)グレーティングによってロックされる。

【0082】なお、MgO-LN基板2に電場を印加するには、以上説明した電極を介して直接電圧を印加する方法、コロナ帯電法および電子線照射法に限らず、その他例えば集束イオンビームを照射する方法等を用いることも可能である。

【0083】また、以上説明したMgO-LN基板2は、その表面2aに平行な方向および垂直な方向に対して、それぞれZ軸およびY軸がオフセットしているものであるが、少なくともZ軸がオフセットしていれば同様の効果が得られることは自明である。

【0084】さらに、以上説明した光導波路はプロトン交換とアニールによって形成されたものであるが、Tiを拡散してなる光導波路が用いられてもよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態による光波長変換素子を示す概略図

【図2】本発明の光波長変換素子における基板の分極の向きを説明する概略図

【図3】従来の光波長変換素子の一例を示す概略図

【図4】従来の光波長変換素子の別の例を示す概略図

【図5】本発明の第1の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図6】図5の光波長変換素子に用いられる基板のカット状態を説明する概略図

【図7】図5の光波長変換素子に形成されるドメイン反転部を示す概略斜視図

【図8】本発明の第2の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図9】本発明の第3の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 10】本発明の第 4 の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 11】本発明の第 5 の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 12】本発明の第 6 の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 13】本発明の第 7 の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 14】本発明の第 8 の実施の形態による光波長変換素子を作成する様子を示す概略斜視図

【図 15】本発明の光波長変換モジュールの一例を示す概略側面図

【図 16】本発明の光波長変換モジュールの別の例を示す概略側面図

【図 17】本発明の光波長変換素子の基板に形成されたドメイン反転部のパターンの顕微鏡写真

【図 18】従来の光波長変換素子の基板に形成されたドメイン反転部のパターンの顕微鏡写真

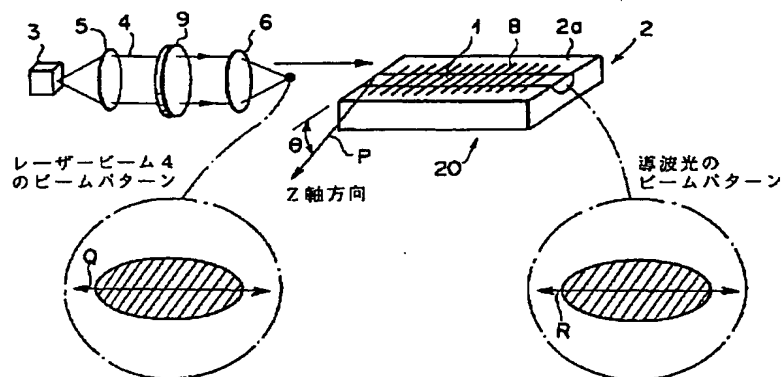
【図 19】従来の光波長変換素子の問題を説明する説明

図

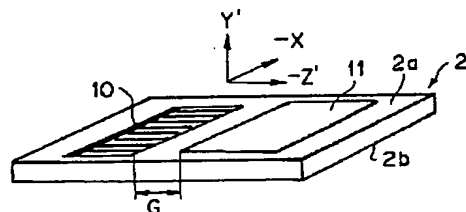
【符号の説明】

- 1 光導波路
- 2 基板
- 2 a、2 b 基板の表面
- 3 半導体レーザー
- 4 レーザービーム（基本波）
- 5、50 コリメーターレンズ
- 6 集光レンズ
- 7 $\lambda/2$ 板
- 8 ドメイン反転部
- 9 バンドパスフィルター
- 10 楕形電極
- 11 平板電極
- 20 光波長変換素子
- 30 コロナヘッド
- 40 電子線
- 51 ダイクロイックミラー
- 52 グレーティング

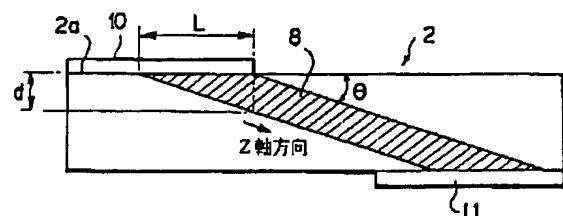
【図 1】



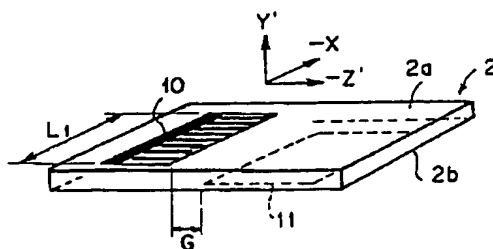
【図 8】



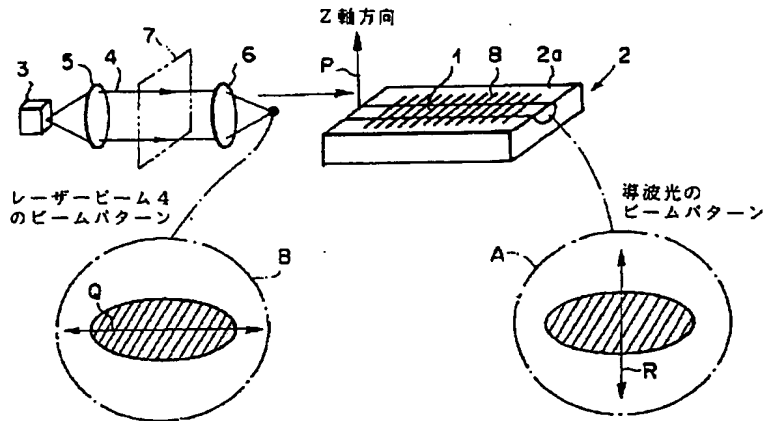
【図 2】



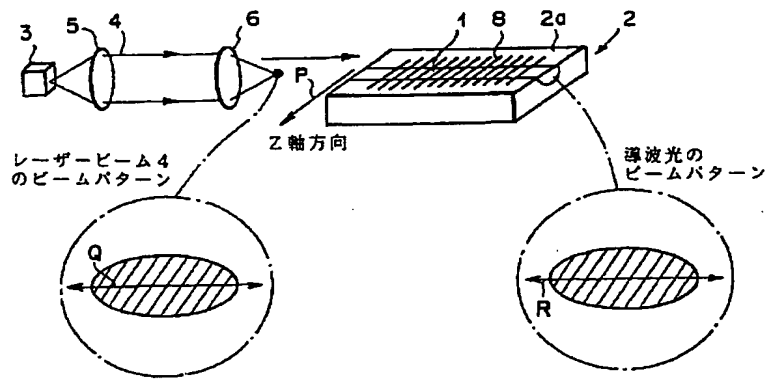
【図 5】



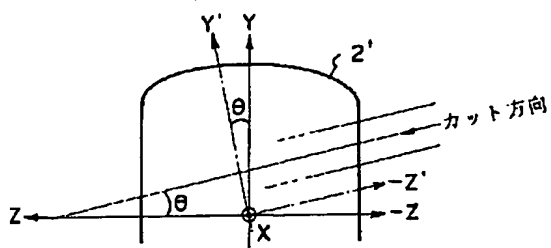
【図3】



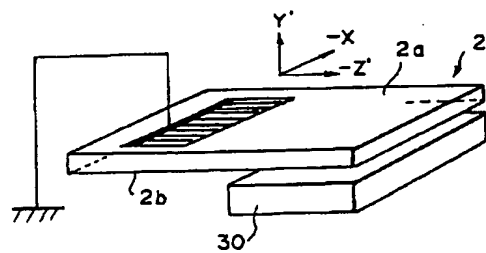
【図4】



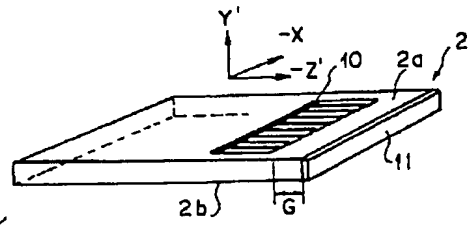
【図6】



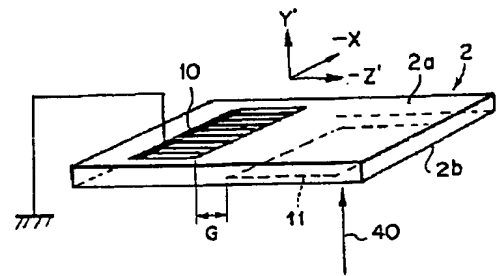
【図10】



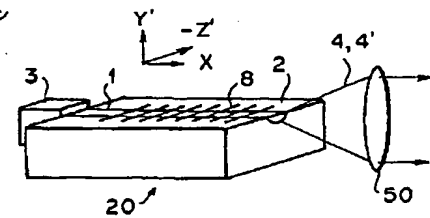
【図9】



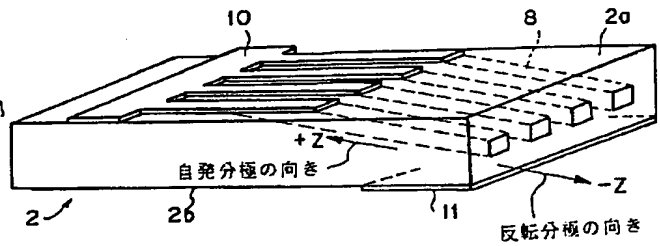
【図11】



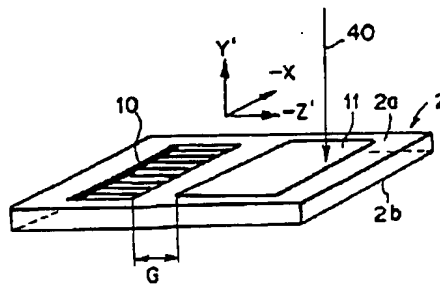
【図16】



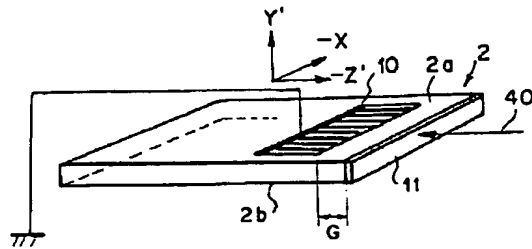
【図7】



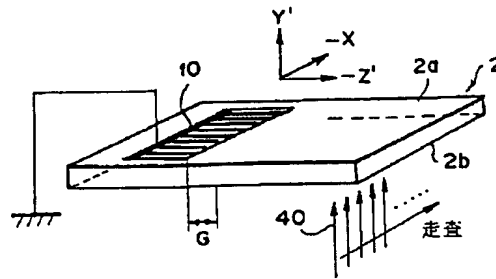
【図12】



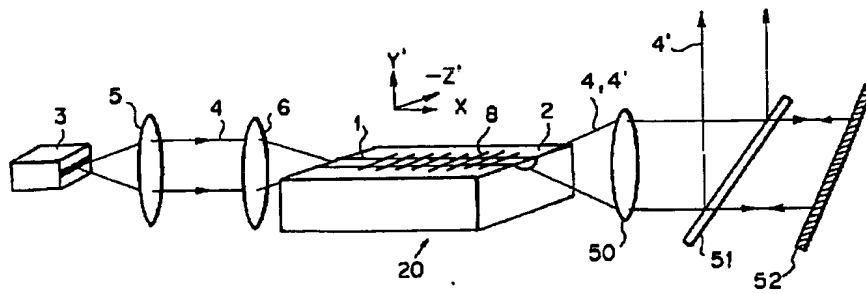
【図13】



【図14】



【図15】



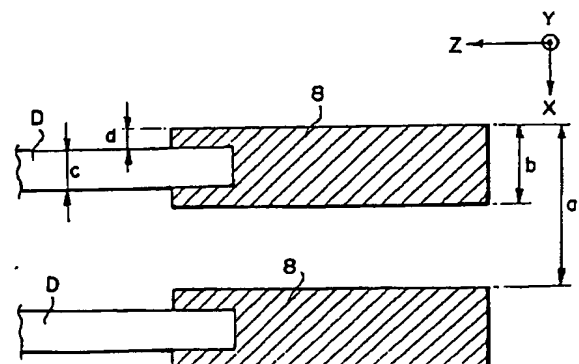
【図17】

5 μ m

【図18】

5 μ m

【図19】



フロントページの続き

(72) 発明者 松本 研司
神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富
士写真フイルム株式会社内